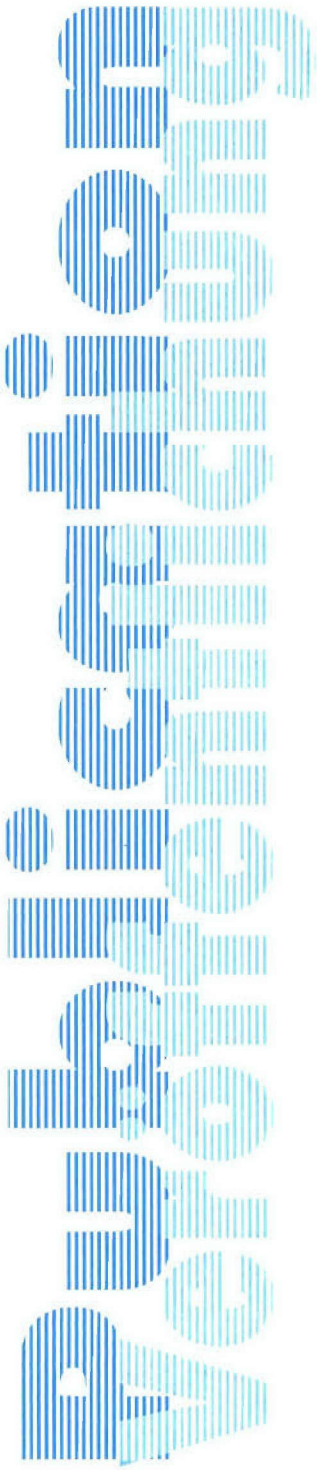
INSTITUT FRANCO-ALLEMAND DE RECHERCHES DE SAINT-LOUIS
DEUTSCH-FRANZÖSISCHES FORSCHUNGSINSTITUT SAINT-LOUIS

5 rue du Général Cassagnou - 68301 Saint-Louis - France

Tél. +33 (0)3 89 69 50 00 - Fax +33 (0)3 89 69 50 00
http://www.isl.tm.fr

Adresse postale : BP 70034 - 68301 SAINT LOUIS CEDEX - France
Postanschrift: Postfach 1260 - 79574 Weil am Rhein - Deutschland



Bouchon d'oreille à atténuation active adaptée aux bruits d'hélicoptère

Gehörschutzstöpsel mit aktiver Dämpfung, geeignet für Hubschrauberlärm

ZIMPFER-JOST V., BUCK K.

8e Congrès Français d'Acoustique, Tours, FR, 24–27 avril 2006

PU 619/2006

Axe de recherches
Schwerpunkt **2.12**

REPORT DOCUMENTATION PAGE

Form Approved OMB No. 0704-0188

Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302, and to the Office of Management and Budget, Paperwork Reduction Project (0704-0188), Washington, DC 20503.

1. AGENCY USE ONLY (Leave blank)	2. REPORT DATE	3. REPORT TYPE AND DATES COVERED
	April 2006	Conference Report, 24-27 April 2006 .

4. TITLE AND SUBTITLE

Bouchon d'oreille à atténuation active adaptée aux bruits d'hélicoptère

Gehörschutzstöpsel mit aktiver Dämpfung, geeignet für Hubschrauberlärm

(Ear plugs for active attenuation adapted for helicopter noises)

5. FUNDING NUMBERS

6. AUTHOR(S)

V. Zimpfer-Jost and K. Buck

7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)

ISL

9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES

ISL
5 rue du General Cassagnou
68301 Saint-Louis, France

10. SPONSORING/MONITORING AGENCY REPORT NUMBER

PU 619/2006

11. SUPPLEMENTARY NOTES

Text in French, 6 pages, 4 references, 8 figures. Presented at the 8th Congrés Français d' Acoustique, Tours, France, 24-27 April 2006.

12a. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT

Public release. Copyrighted. (1 and 21)

12b. DISTRIBUTION CODE

ABSTRACT (Maximum 200 words)

The specter of helicopter noise is composed of two very distinct parts. The first is a component low frequencies (< 600 Hz) correspondent to the noise of the motor. The second consists of the tonal components between 800 Hz and 3 characteristic kHz of the noise descended of the reduction limps. The use of a helmet to active attenuation classic to reduce this hindrance, can pose a problem since the domain of noise amplification (réjectio) for this protective type is often located in the domain of tonal components. The use of an ear plug to active attenuation with a buckle of against reaction should permit an active attenuation up to 2 kHz. In this case, while using midget loudspeakers of type electrodynamics (high volume auditory prosthesis) proves to be that such a system doesn't provide enough attenuation and/or is not steady enough. This problem especially concerns the tonal components that are not attenuated sufficiently. For the helicopter noise, a mixed system using two principles is proposed:

- the first, based on a buckle of against reaction (feedback) is optimized for the noises low frequencies (< 600 Hz) ;
- the second based on the prediction (feedforward) permits to treat the tonal components to 800 Hz.

This paper shows that such a protection to active attenuation is feasible and that the performance of the system is adapted to the specific needs.

Machine assisted translation.

14. SUBJECT TERMS

UNIBW, German, plug of ear, active attenuation, murmurs of helicopter, feedback, feedforward.

15. NUMBER OF PAGES

16. PRICE CODE

17. SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT	18. SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE	19. SECURITY CLASSIFICATION OF ABSTRACT	20. LIMITATION OF ABSTRACT
UNCLASSIFIED	UNCLASSIFIED	UNCLASSIFIED	UL

Bouchon d'oreille à atténuation active adaptée aux bruits d'hélicoptère

Gehörschutzstöpsel mit aktiver Dämpfung, geeignet für Hubschrauberlärm

Résumé

Le spectre du bruit d'un hélicoptère se compose de deux parties bien distinctes. La première est une composante basses fréquences (< 600 Hz) correspondant au bruit du moteur. La deuxième comprend des composantes tonales entre 800 Hz et 3 kHz caractéristiques du bruit issu de la boite de réduction. L'utilisation d'un casque à atténuation active classique pour réduire cette gêne, peut poser un problème puisque le domaine d'amplification du bruit (réjectio) pour ce type de protection se situe souvent dans le domaine des composantes tonales. L'utilisation d'un bouchon d'oreille à atténuation active avec une boucle de contre réaction devrait permettre une atténuation active jusqu'à 2 kHz. Dans ce cas, en utilisant des haut-parleurs miniatures de type électrodynamique (haut parleur de prothèse auditive) il s'avère qu'un tel système ne fournit pas assez d'atténuation et/ou n'ést pas assez stable. Ce problème concerne surtout les composantes tonales qui ne sont pas suffisamment atténuées. Pour le bruit d'hélicoptère, un système mixte utilisant deux principes est proposé:

- le premier, basé sur une boucle de contre réaction (feedback) est optimisé pour les bruits basses fréquences (< 600 Hz) ;
- le deuxième basé sur la prédiction (feedforward) permet de traiter les composantes tonales > 800 Hz.

Ce papier montre qu'une telle protection à atténuation active est réalisable et que la performance du système est adaptée aux besoins spécifiques.

Mots-clés : bouchon d'oreille, atténuation active, bruit d'hélicoptère, feedback, feedforward.

Zusammenfassung

Das Geräuschspektrum eines Hubschraubers ist aus zwei deutlich verschiedenen Komponenten zusammengesetzt. Die erste, tieffrequente Komponente entspricht Fluggeräuschen. Die zweite, bestehend aus harmonischen Schallen mit einer Grundfrequenz von etwa 800 Hz, wird durch Vibrationen im Reduktionsgetriebe hervorgerufen. Bei klassischen ANR (Acive Noise Reduction)-Gehörschutzkappen, treten im Bereich um 800 Hz häufig Verstärkungen auf, was eine Benutzung dieser Systeme im Hubschrauberlärm problematisch macht. Die Nutzung eines auf dem Rückkoppelungsprinzip basierenden ANR-Gehörschutzstöpsels erlaubt eine aktive Dämpfung bis etwa 2 kHz. In diesem Fall werden elektrodynamische Miniaturlautsprecher, wie sie normalerweise bei Hörgeräten eingesetzt werden, benützt. Allerdings ist bei dieser Technologie die aktive Dämpfung, insbesondere der tonalen Komponenten, und/oder die Stabilität nicht ausreichend. Für die Nutzung im Hubschrauberlärm schlagen wir daher ein System vor, welches zur aktiven Dämpfung der zwei unterschiedlichen Komponenten verschiedene Prinzipien nutzt:

- zur Dämpfung der tieffrequenten Komponenten(< 600 Hz) wird ein optimiertes rückgekoppeltes System benützt,
- zur Dämpfung der höherfrequenten tonalen Anteile (> 800 Hz) wird ein adaptives Feedforward-System eingesetzt.

Im vorliegenden Bericht werden die Realisierbarkeit und die Leistungsfähigkeit eines derartigen ANR-Gehörschutzstöpsels gezeigt.

Schlagwörter: Gehörschutzstöpsel, aktive Dämpfung, Hubschrauberlärm, Feedback, Feedforward.

AQ FA6-12-0363

Bouchon d'oreille à atténuation active adaptée aux bruits d'hélicoptère

Zimpfer-Jost Véronique, Buck Karl

ISL, Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis, 68301 Saint-Louis, France,
Courriel : zimpfer@isl.tm.fr, buck_k@isl.tm.fr

Résumé

Le spectre du bruit d'un hélicoptère se compose de deux parties bien distinctes. La première est une composante basses fréquences (<600 Hz) correspondant au bruit du moteur. La deuxième comprend des composantes tonales entre 800 Hz et 3 kHz caractéristiques du bruit issu de la boite de réduction. L'utilisation d'un casque à atténuation active classique pour réduire cette gêne, peut poser un problème puisque le domaine d'amplification du bruit (réjectio) pour ce type de protection se situe souvent dans le domaine des composantes tonales. L'utilisation d'un bouchon d'oreille à atténuation active avec une boucle de contre réaction devrait permettre une atténuation active jusqu'à 2 kHz. Dans ce cas, en utilisant des haut-parleurs miniatures de type électrodynamique (haut parleur de prothèse auditive) il s'avère qu'un tel système ne fournit pas assez d'atténuation et/ou n'ést pas assez stable. Ce problème concerne surtout les composantes tonales qui ne sont pas suffisamment atténuées. Pour le bruit d'hélicoptère, un système mixte utilisant deux principes est proposé:

- le premier, basé sur une boucle de contre réaction (feedback) est optimisé pour les bruits basses fréquences (<600 Hz)
- le deuxième basé sur la prédiction (feedforward) permet de traiter les composantes tonales > 800 Hz.

Ce papier montre qu'une telle protection à atténuation active est réalisable et que la performance du système est adaptée aux besoins spécifiques.

Introduction

Dans beaucoup de véhicules bruyants, la qualité des communications est dégradée par des bruits excessifs. Pour améliorer la communication, des protecteurs auditifs actifs ont été réalisés. L'utilisation d'un casque actif classique permet d'atténuer les basses fréquences responsables du masquage du signal de phonie, et d'améliorer ainsi l'intelligibilité de la parole. L'inconvénient majeur de ces protecteurs est une amplification du bruit généralement aux alentours de 1kHz. Dans un hélicoptère où, en plus du bruit basses fréquences, il y a des fortes composantes tonales entre 800 Hz et 3 kHz, l'efficacité des casques actifs est donc réduite par cet effet d'amplification, les composantes tonales étant amplifiées.

Un bouchon d'oreille à atténuation active de bruit devrait permettre, à l'aide d'une boucle de contre réaction, une atténuation active jusqu'à 2 kHz. Les premiers essais de bouchons d'oreille à atténuation active ont permis de montrer qu'il est possible d'obtenir une atténuation active avec une boucle de régulation (système feedback) numérique [1]. Dans cette étude, on utilisait une céramique piézo-électrique comme haut-parleur. Avec ce type d'émetteur, on arrivait à obtenir une atténuation active jusqu'à 2 kHz [1] [2]. Malheureusement, l'utilisation de ce type de transducteur est limitée par son rendement. Pour obtenir les niveaux exigés par le système ANR (Active Noise Reduction) la tension d'alimentation doit dépasser 50 V. Pour ces raisons, l'utilisation de ce type de haut-parleur est limitée aux conceptions expérimentales.

D'autres expériences ont été menées en utilisant des haut-parleurs miniatures électromagnétiques de type « prothèse auditive » qui offrent un très bon rendement. Les fonctions de transfert électroacoustique de ces haut-parleurs permettent une bonne atténuation active jusqu'à 1 kHz. Avec ce type d'émetteur, la phase de la fonction transfert du système électroacoustique nous empêche d'obtenir une atténuation active au delà de 1 kHz.

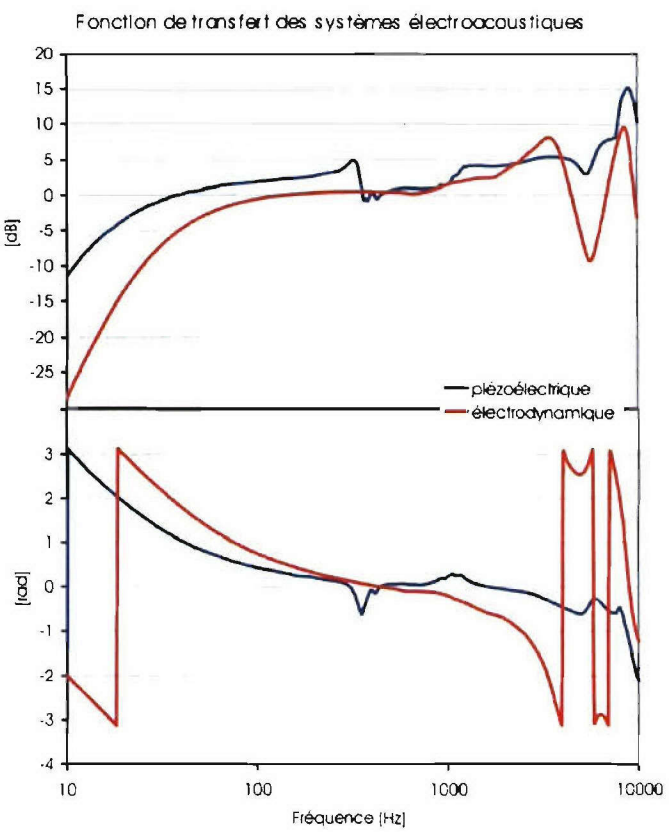


Figure 1 : Fonction de transfert de deux prototypes de bouchon d'oreille à atténuation active utilisant deux émetteurs différents: courbe bleu une céramique piézoélectrique, courbe rouge haut parleur électromagnétique.

La Figure 1 montre la différence d'un prototype utilisant une céramique piézoélectrique et d'un prototype utilisant un haut-parleur électromagnétique de type « prothèse auditive ». Cette figure montre la différence entre les phases des deux types d'émetteurs pour une distance microphone – haut parleur quasi identique (2-3 mm) pour les deux prototypes. La phase pour un haut parleur électromagnétique présente un « retard pur » qui est supérieur au retard causé par la distance séparant le microphone au haut parleur. Ce déphasage observé sur les fonctions de transfert du système électro-acoustique avec un haut parleur électrodynamique est actuellement inexpliqué [3].

Actuellement, nous n'avons pas trouvé de haut-parleur miniature électrodynamique permettant d'obtenir une atténuation active au-delà de 2 kHz en utilisant une boucle de contre réaction. On propose donc de traiter le bruit d'hélicoptère en deux parties comme le montre la Figure 2 :

- pour les basses fréquence on propose un système feedback numérique [1]
- pour les bruits tonales au-delà de 800 Hz un système feedforward adaptatif [4], Puisque le principe feedforward a de bonnes performances lorsque le bruit est périodique ou à bande étroite.

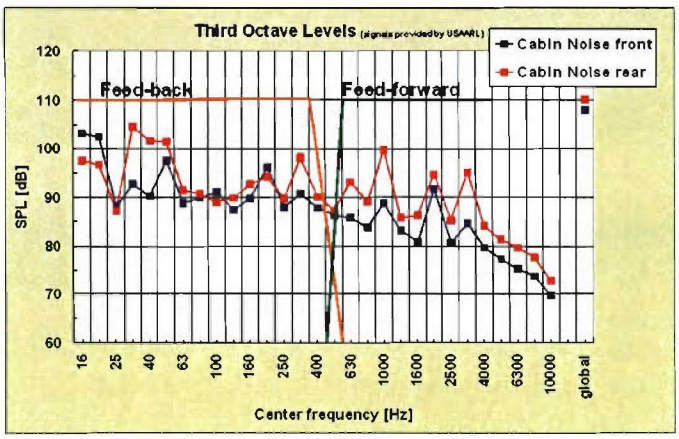


Figure 2 : Tiers d'octave du bruit enregistré dans un hélicoptère: courbe rouge dans la cabine avant et la courbe bleu dans la cabine arrière.

également du filtre passe-bande. Cette réponse impulsionnelle notée he a été estimée à l'aide de la mesure de la réponse indicielle (réponse à U(t)). Cette réponse impulsionnelle est représentée sur la Figure 4.

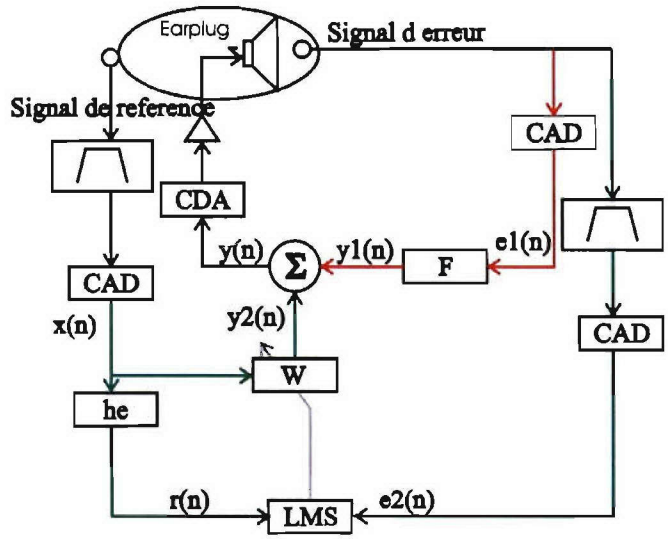


Figure 3 : Système actif proposé: le chemin rouge représente le système feedback et le chemin vert représente le système feedforward utilisant l'algorithme Fx-LMS

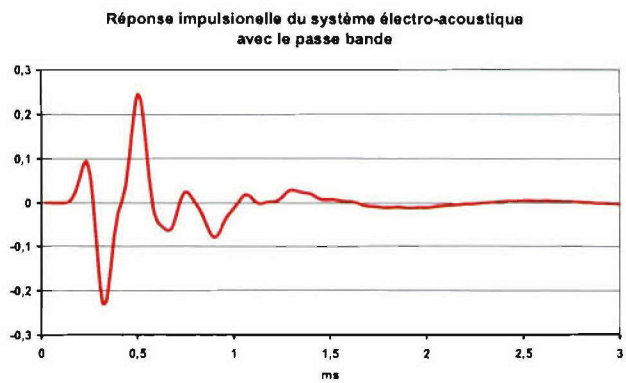


Figure 4 : Réponse impulsionnelle du système électroacoustique (haut-parleur et microphone d'erreur) avec le filtre passe-bande.

Système actif

La Figure 3 décrit le système actif que l'on propose pour cette application. Sur ce diagramme le chemin rouge représente le système feedback et le chemin vert représente le système feedforward.

Etant donné que le système feedforward doit traité uniquement les composantes tonales au-delà de 800 Hz, on a mis deux filtres passe bande, 700 Hz – 5 kHz afin d'augmenter la vitesse de convergence. Pour le système feedforward on a choisi l'algorithme Fx_LMS [4] pour adapter le filtre W de type RIF (à Réponse Impulsionnelle Finie). Pour l'algorithme Fx_LMS, il est nécessaire d'estimer la réponse impulsionnelle entre le microphone d'erreur et le haut-parleur. Dans notre cas on tient compte

Les deux principes ont été réalisés en numérique. Dans ce cas le signal numérique représentant l'ant-bruit, noté y(n) est la somme de deux signaux :

$$y(n) = y_1(n) + y_2(n) \quad (1)$$

où $y_1(n)$ provient du système feedback et $y_2(n)$ du système feedforward.

Les signaux $y_1(n)$ et $y_2(n)$ sont déterminés afin de diminuer le signal d'erreur. Pour le système feedback, le signal $y_1(n)$ s'écrit :

$$y_1(n) = F \cdot e_1(n) \quad (2)$$

où F est le filtre de compensation permettant de rendre stable le système bouclé. F est un filtre numérique de type RII (à Réponse Impulsionnelle Infinie) [1]. Pour ce type de contrôle l'atténuation active est donc fixé à

$$A_{feedback} = 20 * Log(1 + FH) \quad (3)$$

où H est la fonction de transfert du système électroacoustique (courbe rouge sur la Figure 1).

Les coefficients du filtre F ont été estimés à l'aide de la fonction de transfert du système électroacoustique (entre haut parleur et microphone d'erreur) afin d'obtenir une atténuation active dans les basses fréquences. Un filtre a donc été déterminé, il permet d'obtenir une atténuation active entre 40 Hz et 700 Hz avec un max de 15 dB à 130 Hz (voir Figure 5). Ce filtre comporte deux cellules du second ordre. Le gain du filtre a été fixé afin de garantir une marge de sécurité d'1/2 (ce qui correspond à une amplification maximale de 6 dB).

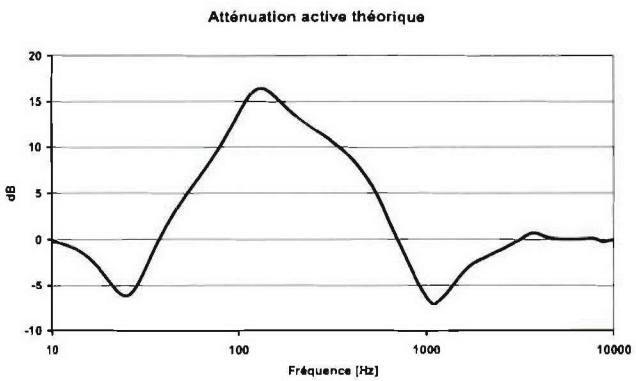


Figure 5 : Atténuation active théorique pour le système feedback.

Pour le système feedforward, le signal correspond à l'anti-bruit vaut :

$$y_2(n) = \sum_{k=0}^{k<N} w_k(n) \cdot x(n-k) \quad (4)$$

Où W est le filtre numérique adaptatif de type FIR. Il est adapté avec l'algorithme Fx_LMS [4] afin de minimiser l'erreur quadratique e_2. il est donc défini par :

$$w_k(n+1) = w_k(n) - \frac{\mu}{\sigma_r(k)} \cdot e_2(n) r(n-k) \quad (5)$$

Avec k=0,1,.....,N

où N est la taille du filtre adaptatif, μ un coefficient permettant de régler la vitesse de convergence de l'algorithme Fx_LMS. Plus μ est grand plus l'algorithme a des risques de diverger, et plus il est petit plus l'algorithme converge lentement. Mais il doit être inférieur à 1/N ; $\sigma_r(n)$ représente la puissance instantanée du signal de référence filtré par la réponse impulsionnelle. Cette puissance instantanée est définie par :

$$\sigma_r(n) = \beta \cdot \sigma_r(n-1) + (1-\beta) \cdot r^2(n) \quad (6)$$

Où β est un réel compris entre 0 et 1, fixé à 0,99 dans notre application.

Pour le système feedforward, l'atténuation active n'est pas fixée, elle dépend du coefficient μ et des valeurs d'initialisation de l'algorithme Fx_LMS.

Description du prototype

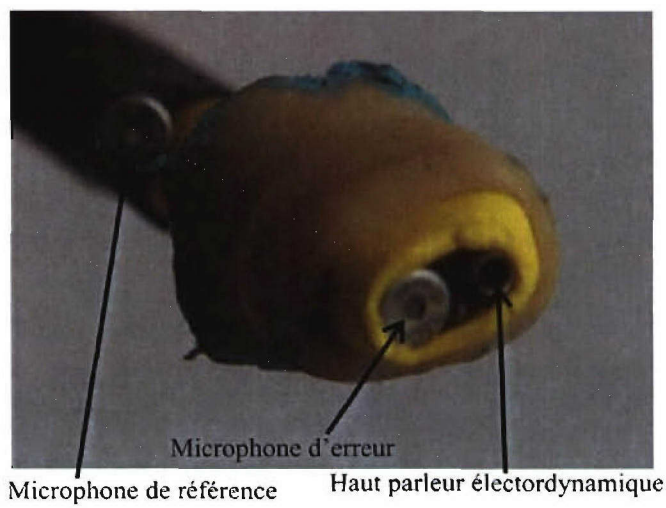


Figure 6 : Photos du prototype de bouchon d'oreille à atténuation active

La Figure 6 représente le prototype du bouchon d'oreille testé. Il est composé pour la partie dans la gaine jaune d'un microphone d'erreur et d'un mini haut-parleur électromagnétique. Il possède également un microphone extérieur afin de mesurer le signal de référence nécessaire pour le système feedforward.

Les caractéristiques du système électroacoustique sont

- microphone d'erreur : Knowles FG3329
- microphone de référence : Knowles FG3329
- haut parleur électrodynamique de chez Knowles.

La sensibilité des deux microphone est quasi la même, et vaut 200 mV/pa en tenant compte du pré-ampli (gain de 20 dB)

Les différents algorithmes ont été implémentés dans une carte processeur PowerPC-GX à 933 MHz incluant une carte 5 entrées analogiques 16 bits et une carte 6 sorties analogiques 16 bits.

Résultats expérimentaux

L'enregistrement d'un bruit d'hélicoptère est reproduit par un haut parleur adapté dans une chambre réverbérante. Le

bruit résiduel est enregistré par un microphone correspondant au tympan dans un simulateur d'oreille de la tête artificielle (voir Figure 7) pour différentes configurations :

- sans atténuation active,
- système feedback seul,
- système feedforward seul,
- les deux systèmes actifs.

Les différents paramètres sont les suivantes :

- la fréquence d'échantillonnage fixée à 50 kHz.
- La taille du filtre adaptatif W, de la réponse impulsionelle he, fixées à 150 points

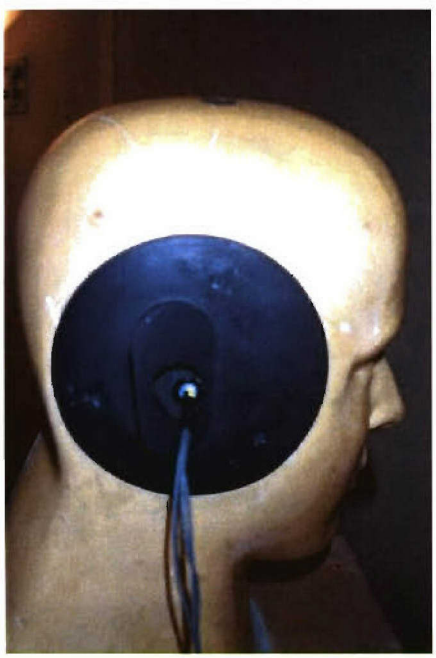


Figure 7 : Photo représentant le bouchon d'oreille inséré dans une tête artificielle.

La figure 8 représente le niveau du bruit sous le bouchon d'oreille avec ou sans systèmes actifs. La courbe en bleu foncé représente le niveau du bruit sous la protection sans système actif. La courbe en rose représente le niveau du bruit sous la protection avec le système feedback seul. On peut constater une diminution du bruit dans les basses fréquences de 15 dB maximum à 130 Hz (comme prévoie la théorie voir Figure 5) et une augmentation des composantes tonales. La courbe en jaune représente le niveau du bruit sous la protection avec un système feedforward seul. On peut constater que ce système permet de diminuer de 15 dB les composantes tonales. La courbe en bleu clair représente le niveau du bruit sous la protection avec le système actif mixte (feedback + feedforward). On constate qu'avec le système actif mixte, il est possible de diminuer le bruit basse fréquence et de réduire les composantes tonales gênantes en même temps.

La Figure 8 montre que le double système est le plus adapté pour ce type de bruit.

Elle montre aussi qu'il est possible

- d'obtenir une atténuation active avec un contrôle feedback numérique,
- d'obtenir une atténuation active avec un contrôle feedforward avec un bouchon d'oreille,
- d'obtenir un système actif stable en utilisant les deux principes (feedback et feedforward) ensemble.

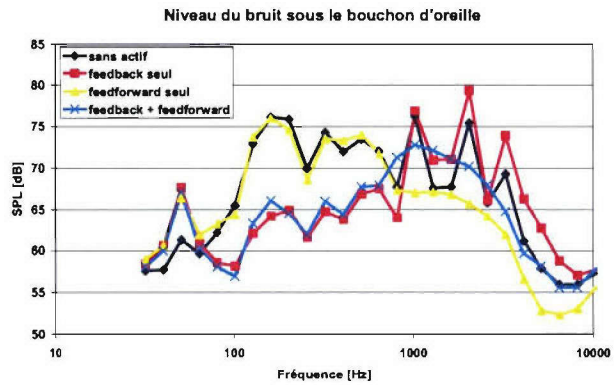


Figure 8 : Niveau du bruit sous la protection

Conclusion

On a montré la faisabilité d'un système actif stable en combinant les deux principes d'atténuation active (feedback et feedforward). Ce système actif utilisant les deux contrôles est adapté aux bruits d'hélicoptère comportant un bruit basse fréquence et des composantes tonales vers 1 kHz.

On pourrait envisager d'utiliser ce double système actif pour d'autres applications comme la réduction du bruit des machines tournantes (scies à ruban..) pour lesquelles le spectre du bruit possède une partie tonale.

Références

[1] V. Zimpfer, P. Hamery, K. Buck, Active earplug with the digital closed loop,regulation, InterNoise2001, the Hague, Nederland.

[2] K. Buck, V. Zimpfer, P. Hamery, An Active Noise Réduction Ear Plug with Digitally driven feedback loop, Internoise 2002, Dearborn/MI, USA.

[3] K. Buck, V. Zimpfer, A. Dancer, P. Hamery, P. Herzog Are Electromagnetic receivers suitable for ANR earplugs, Forum Acousticum, Strasbourg, France.

[4] Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, Active Noise Control: a Tutorial Review, the proceedings of the IEEE, vol 87, N°6, June 1999.